

„Ultrasonic Impact Technology“ – Eine Möglichkeit zur Erhöhung der Lebensdauer von Schweißkonstruktionen?

Peter Gerster, Ehingen/Donau

1 Einleitung

Eine Verbesserung der Schwingfestigkeit von Schweißverbindungen gewinnt in vielen Bereichen der Industrie an zunehmender Bedeutung, insbesondere bei Anwendung von höher- und hochfesten Stählen. Diese Stähle, d.h. Baustähle mit einer Nennstreckgrenze größer 355 MPa, nehmen im konstruktiven Stahlbau eine immer größere Rolle ein. Während solche Bereiche wie der Baumaschinenbau (z.B. Mobilkrane, Betonpumpen, usw.) schon seit längerem auf solche Stahlqualitäten zurückgreifen, finden sie nun zunehmend auch Eingang in Konstruktionen des klassischen Stahlhoch- und Brückenbaus. Dies drückt sich auch in einer Anpassung der entsprechenden Konstruktions- und Verarbeitungsregelwerke aus, die in diesem Bereich Verwendung finden. Im Rahmen der Umsetzung der europäischen Bauproduktenrichtlinie wurde mit Datum vom Februar-April 2005 eine neue Norm für Baustahlgüten veröffentlicht. So werden die bisherigen Normen in Zukunft durch die Teile 3, 4 und 6 der DIN EN 10 025 (02-04/2005) abgedeckt.

Einschränkungen erfährt die Verwendung dieser Werkstoffe aber vor allem in ermüdungsbeanspruchten Schweißkonstruktionen, wie sie z.B. im Brücken- und Kranbau vorliegen. Im einfachsten Fall gehen die Regelwerke wie Eurocode EC3, DIN 18800 davon aus, dass sich das Ermüdungsverhalten hochfester Stähle in Schweißkonstruktionen nicht gegenüber dem von normalfesten Stählen unterscheidet, sodass die Effizienz dieser Stähle bei Ausschlag gebendem Betriebsfestigkeitskriterium kritisch hinterfragt werden muss.

Diese einschränkenden Regelungen auf schweißtechnischer Seite stehen zurzeit in Überprüfung. Erste Zwischenergebnisse lassen durchaus die Vermutung zu, dass die oben angesprochenen Einschränkungen zu restriktiv, wenn nicht sogar unbegründet sind. In diesem Vortrag werden unter anderem die hervorragenden Zwischenergebnisse der Untersuchungen aus dem AIF-Forschungsprojekt P 620 des Institutes für Konstruktion und Entwurf an der Universität Stuttgart sowie der MFPA der Bauhaus-Universität Weimar vorgestellt. Thema des Projektes:

„Effizienter Stahlbau aus höherfesten Stählen unter Ermüdungsbeanspruchung“

2 Verbesserung der Ermüdungsfestigkeit

Die Ermüdungsfestigkeit von geschweißten Konstruktionen aus höherfesten Stählen kann wesentlich gesteigert werden, indem die Kerbwirkung der einzelnen Schweißdetails verringert wird. Dies kann bei

einer großen Anzahl von Schweißdetails durch eine kerbarme Detailausbildung verwirklicht werden, indem z.B. fließende Übergänge und Abrundungen an den kritischen Stellen ausgebildet werden. Zusätzlich ist auf eine gute Ausführung mit hoher Schweißqualität möglichst ohne Schweißnahtfehler zu achten. Für eine große Anzahl typischer Konstruktionsdetails des Stahlbaus sind entsprechende Detailausbildungen jedoch konstruktiv nur schwer auszuführen. Im Gegensatz zum Maschinenbau ist im Bauwesen der Einsatz von Verfahren der Schweißnahtnachbehandlung bisher sehr begrenzt. Ursache hierfür sind u. a. die derzeit gültigen Normen im Brückenbau [3] sowie die zukünftigen europäischen Stahlbaunormen [4], die bisher keine Möglichkeit bieten, die Vorteile dieser Verfahren zu nutzen.

Es ist jedoch erwiesen, dass die Ermüdungsfestigkeit von Schweißdetails aus höherfesten Stählen durch eine geeignete Nachbehandlung wie Schleifen, Hämmern, Kugelstrahlen oder das relative neue UIT-Verfahren (Ultrasonic Impact Treatment) teils entscheidend verbessert werden kann.

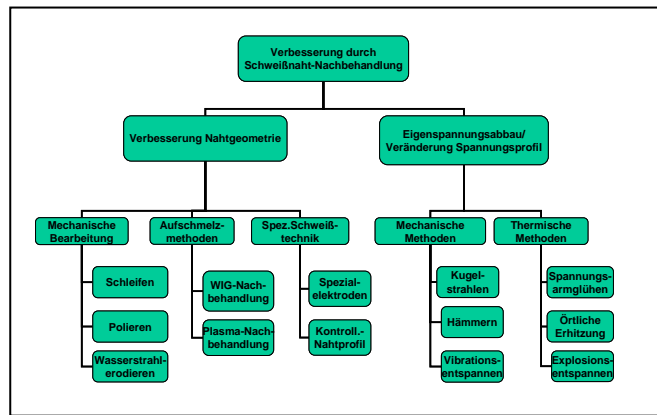


Bild 1. Übersicht der Schweißnahtnachbehandlungsverfahren

3 Schweißnahtnachbehandlungsverfahren

Bild 1 zeigt einen groben Überblick der verschiedenen Nachbehandlungsverfahren, wobei grundsätzlich die Einteilung in zwei Hauptgruppen möglich ist:

- Verbesserung der Nahtgeometrie
- Eigenspannungsabbau durch Veränderung des Spannungsprofils

Die Anwendung der Verfahren der Schweißnahtnachbehandlung beschränkt sich im Allgemeinen auf eine Verbesserung der Ermüdungsfestigkeit am Schweißnahtübergang. Eine mögliche Verlagerung des Anrisses in die Schweißnahtwurzel muss daher berücksichtigt werden.

Beim **Überschleifen** der Schweißnahtübergänge erfolgt eine Verringerung der Kerbschärfe, sowie das

Entfernen von Schweißnahtfehlern an der Oberfläche.

Bei der **WIG-Nachbehandlung** findet durch nochmaliges Aufschmelzen der Schweißnaht ein Ausrunden des Schweißnahtüberganges statt. Es besitzt den Vorteil, dass es von vielen Stahlbaufirmen standardmäßig eingesetzt werden kann. Nachteilig ist, dass ausschließlich in Wannenlage das nochmalige Aufschmelzen erfolgen kann. Speziell höherfeste Stähle profitieren beim WIG-Aufschmelzen aufgrund der höheren Kerbempfindlichkeit und der höheren Ermüdungsfestigkeit des Grundmaterials von der Verringerung der Kerbschärfe.

Zum anderen werden durch Nachbehandlungsmethoden wie Hämmern oder Nadeln Druckeigenstressungen in den Nahtübergang eingebracht. Dabei wird der Nahtübergang plastisch verformt, sodass sich Druckeigenstressungen in der Oberfläche ausbilden. Auch Schweißnahtfehler werden dabei im geringen Umfang beseitigt. Für Anwendungen im Stahlbau besitzt dieses Verfahren jedoch den Nachteil, dass es auf Grund der niedrigen Frequenz, mit der das Hämmern durchgeführt wird, nur unter starken Geräusch- und Vibrationsbelastung durchzuführen ist. Auch wird keine gute Reproduzierbarkeit erreicht. In Europa noch wenig bekannt ist die sogenannte „**Ultrasonic Impact Technology**“ kurz UIT genannt.

Tabelle 1. Vergleich der verschiedenen Nachbehandlungsverfahren

ERGEBNIS	TECHNOLOGIE	SCHLEIFEN	KUGELSTRAHLEN	HÄMMERN & NADELN	SPANNUNGS-ARMGLÜHEN	WIG NACHBEHANDLUNG	Esonix® ULTRASONIC IMPACT TECHNOLOGY
ERHÖHUNG DER BETRIEBSFESTIGKEIT		•	•	•	•	•	•
ERHÖHUNG DER KORROSIONSBESTÄNDIGKEIT			•				•
VERMINDERUNG DES SCHWEISSVERZUGES				•	•		•
VERMINDERUNG DER EIGENSINNUNGEN					•		•

Ein Ultraschallwandler wandelt dabei harmonische Schwingungen in mechanische Impulse um. Dabei erfolgt die eigentliche Nachbehandlung durch ein mechanisches Hämmern mit gehärteten Bolzen bei ca. 200 Hz, wobei gleichzeitig die Ultraschallenergie mit einer Frequenz von 27-55 kHz eingebracht wird (Bild 2). Dadurch wird **gleichzeitig** die Kerbschärfe an der Schweißnaht verbessert und Druckeigenstressungen eingebracht. Die Vorteile dieses Verfahrens liegen in der leichten Bedienbarkeit, der geringen Geräuschbelastung sowie der guten Reproduzierbarkeit der Ergebnisse.

Forschungsergebnisse in Ermüdung von Schweißkonstruktionen haben gezeigt, dass UIT die effizienteste und wirtschaftlichste Behandlung darstellt, zur Verbesserung der spezifischen Eigenschaften im Vergleich mit anderen Techniken wie Schleifen, Kugelstrahlen, Wärmebehandlung, WIG-Behandlung, usw.

Die Ultrasonic Impact Technology kann erfolgreich in vielen verschiedenen Industriebereichen angewendet werden, wie Aerotechnik, KFZ-Industrie, Energie- und Kraftwerkstechnik, Schiffbau, Eisenbahn- und Transportwesen, Stahlbau, Schwerindustrie usw.



Bild 2. UIT-Behandlung der Proben

4 Die Esonix® Ultrasonic Impact Technology

4.1 Geschichte von UIT

Die Esonix® Ultrasonic Impact Technology (UIT) basiert auf der Arbeit des Wissenschaftlers und Ingenieurs Dr. Efim Statnikov, Vize-Präsident von Applied Ultrasonics und Leiter der Forschungs- und Entwicklungsabteilung. Dr. Statnikov entwickelte diesen Prozess, der seine Anwendung in dem Sowjetischen Atom-Marine Programm in 1972 fand. Die Ergebnisse der Anwendung von UIT ermöglichten den Konstrukteuren neue Schiffskörper für Unterseeboote zu entwickeln, die den extremen Bedingungen unter Wasser standhielten und es den U-Booten ermöglichten, tiefer zu tauchen. Anschließend wurde diese Technologie in der Aerotechnik, KFZ-Industrie, Schienentransporttechnik, Komponenten und Konstruktionen angewendet, die einer zyklischen Belastung ausgesetzt sind, wie z.B. Brücken, Baumaschinen und Ausrüstungen, usw. Heute wird UIT hauptsächlich eingesetzt für die Verbesserung der Eigenschaften von Metall-Komponenten und Schweißkonstruktionen.

4.2 Das Prinzip von UIT

UIT basiert auf einer Umwandlung von harmonischen Schwingungen durch einen Ultraschallwandler in mechanische Impulse und hochfrequente Ultraschallenergie und deren Übertragung durch gehärtete Bolzen auf eine zu behandelte Oberfläche. Während diesem Vorgang wird das Spannungsprofil ge-

ändert und bei Schweißnähten die Geometrie des Nahtüberganges wesentlich verbessert.

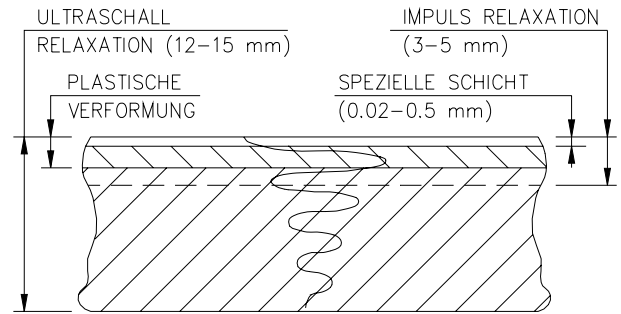


Bild 3. US-Generator mit Handgerät und Kühlaggregat

Die Standardausrüstung (siehe Bild 3) besteht aus dem Ultraschall Generator mit einer Leistung von 1-3 kW und einer Ausgangsfrequenz von 27-55 kHz sowie dem Handgerät mit Adapter für verschiedene industrielle Anwendungen. Ein kleines Kühlaggregat wird für die Kühlung des Handgerätes benötigt. Die kompakte transportable Anlage ermöglicht auch eine problemlose UIT-Behandlung auf Baustellen. Ebenso kann die Anlage auch sehr leicht im Produktionsprozess integriert werden, zum Beispiel Einsatz durch einen Roboter bei großen Stückzahlen.



Bild 4. Behandlung einer Schweißnaht



Zone	Charakteristik
„Spezielle Schicht“	Erhöhung des Widerstandes gegen Verschleiß, Korrosion und der Oberflächengüte
Plastische Verformung	Erhöhung der Lebensdauer, Kompensation des Schweißverzuges, Erniedrigung der Korrosionsermüdung, Druckeigenspannungen
Impuls Relaxation	Erniedrigung der Eigenspannungen um bis zu 70 % des Ausgangswertes
Ultraschall Relaxation	Erniedrigung der Eigenspannungen um bis zu 50 % des Ausgangswertes

Bild 5. Wirkungsweise der UIT-Behandlung dargestellt am Querschnitt einer Metallprobe

Die Ultrasonic Impact Technology wird angewendet um folgendes zu erreichen:

- Erhöhung der Lebensdauer
- Reduzierung und Kontrolle des Verzuges
- Verbesserung des Korrosionswiderstandes
- Erhöhung der Oberflächenhärte
- Ersatz des Spannungsarmglühens

durch:

- Plastische Verformung der Oberfläche
- Veränderung des Spannungsprofils
 - Einbringen von Druckspannungen bis zu einer Tiefe von 5 mm - abhängig von den Materialeigenschaften
- Reduzierung von Zugeigenspannungen
- Erhöhung der mech. techn. Eigenschaften
- Verbesserung der Eigenschaften der Oberfläche und unter der Oberfläche

Diese Technologie ist Eigentum und patentiert von Applied Ultrasonics, USA.

5 Forschungsprojekt P620

Mit dem Hintergrund, durch bessere Ermüdungsfestigkeiten die Wirtschaftlichkeit von Stahlverbundbrücken zu fördern, wurden im Rahmen des AIF-Forschungsprojekts „Effizienter Stahlbau aus höherfesten Stählen unter Ermüdungsbeanspruchung“ am Institut für Konstruktion und Entwurf der Universität Stuttgart sowie an der Materialforschungs- und Prüf-anstalt der Bauhaus-Universität Weimar die Effizienz von verschiedenen Nachbehandlungsverfahren an Schweißdetails aus höherfesten Stählen untersucht. Insgesamt besteht das Versuchsprogramm aus 200 Kleinprüfkörpern, 50 Großprüfkörpern sowie 12 Trägerversuchen. Dabei erfolgt eine Konzentration auf das für Brücken wie oben beschriebene kritische Kerbdetail Quersteife.

Im Folgenden sollen erste Zwischenergebnisse des Projekts dargestellt werden, die [8] entnommen wurden.

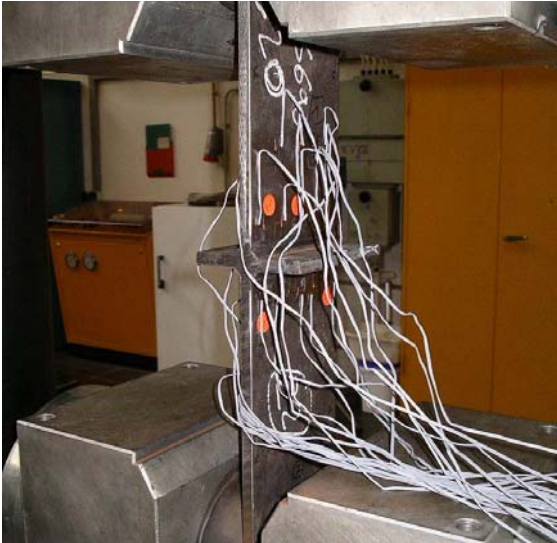


Bild 6. Probe mit Dehnmessstreifen

Abbildung 6 zeigt die Probe vom Typ 2 eingespannt in der Prüfmaschine mit angebrachten Dehnmessstreifen.

Die Bilder 7-9 zeigen die ersten Ergebnisse an Kleinprüfkörpern aus verschiedenen Stahlsorten unter der Belastung eines Einstufenkollektivs mit $R=0,1$. Dabei wurden die Ermüdungsfestigkeiten $\Delta\sigma_C$ bei 2 Millionen Lastwechsel bei einer Überlebenswahrscheinlichkeit von 50 % angegeben. Auf die Angabe von charakteristischen Ermüdungsfestigkeiten wird hier auf Grund der noch geringen Anzahl von Versuchen verzichtet.

Es wird deutlich, dass durch die Nachbehandlung die Ermüdungsfestigkeit gesteigert werden kann, wobei die besten Ergebnisse mit dem UIT-Verfahren erzielt werden. Im Bereich der Kurzzeitfestigkeit ist der Effekt jedoch deutlich kleiner als im Bereich der Dauerfestigkeit, da hier die eingebrachten Druckspannungen einen geringeren Effekt gegenüber der äußeren Last aufweisen. Die Versuchskörper versagten üblicherweise am Schweißnahtübergang, nur bei Versuchen der Güte S690 mit Anwendung des UIT-Verfahrens verlagerten sich die Risse ins Grundmaterial oder den Einspannbereich.



Bild 10. Bruch im Grundwerkstoff bei S690

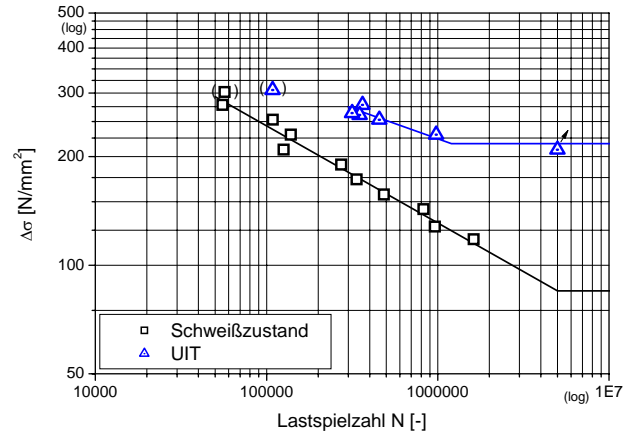


Bild 7. Wöhlerdiagramm (Kleinprüfkörper, Quersteife, S355, $R=0,1$)

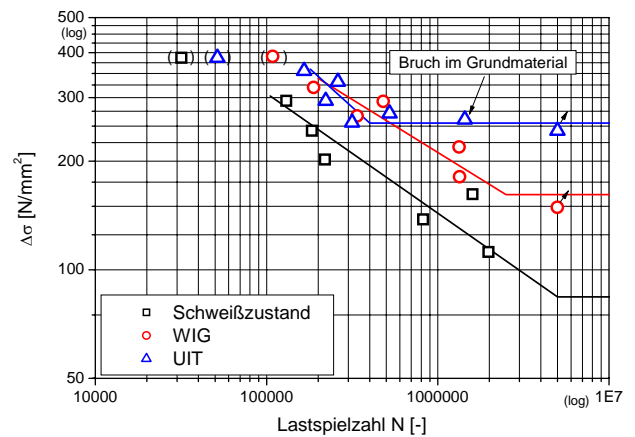


Bild 8. Wöhlerdiagramm (Kleinprüfkörper, Quersteife, S460, $R=0,1$)

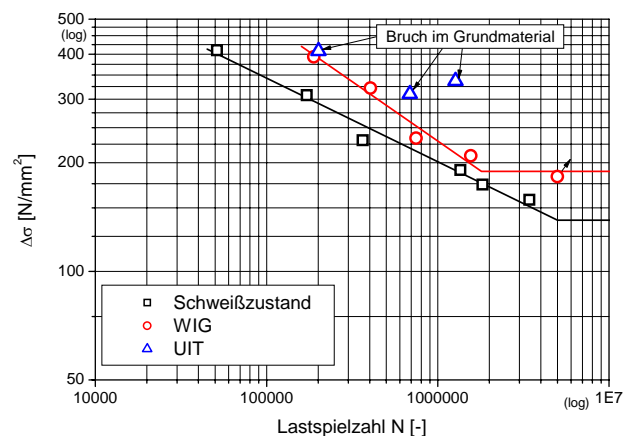


Bild 9. Wöhlerdiagramm (Kleinprüfkörper, Quersteife, S690, $R=0,1$)

Zu der Stahlgüte S690 wurde auch der Parameter Mittelspannung mit R -Werten von -1 ; $0,1$ und $0,5$ variiert. Es ergab sich an UIT-nachbehandelten Proben ein leichter Einfluss der Mittelspannung auf die Ermüdungsfestigkeit in der Größenordnung der DIN 4132.

Des Weiteren konnte ein deutlicher Einfluss der Größe des Prüfkörpers im Schweißzustand festgehalten werden. Bei den Großprüfkörpern mit einer Breite von etwa 160 mm ergaben sich rund 20 % geringere Ermüdungsfestigkeiten als bei den Kleinprüfkörpern von 40 mm Breite. Bei Prüfkörpern mit UIT-Nachbehandlung konnte dieser Einfluss nicht mehr festgestellt werden.

An geschweißten Trägern wurden Ermüdungsversuche mit einem Spannungsverhältnis von $R = -1$ durchgeführt. Für die Träger ohne eine Nachbehandlung der Naht begann wie erwartet der Anriss am Kerbdetail der Quersteife mit Ermüdungsfestigkeiten, die rund 35 % geringer waren als bei Kleinprüfkörperversuchen. Bei den Trägern mit UIT-Nachbehandlung wurde eine Verlagerung des Anrisses vom Nahtübergang der Quersteife in die Längsnaht festgestellt mit einer Lebensdauer, die um ca. 40 % höher ist als im unbehandelten Zustand. Weitere Versuche erfolgen hier, um die ersten Ergebnisse statistisch abzusichern.

Ferner wurden Nahtgeometrien und Kerbfaktoren bestimmt. Dazu sei auf [8] verwiesen.

Es liegt natürlich nahe, eine Nachbehandlung auch während der Nutzungsdauer einer Konstruktion durchzuführen, um so die **Restlebensdauer** zu steigern. Hierzu wurden Ermüdungsversuche an vorgeschädigten Prüfkörpern durchgeführt.

Diese Versuchkörper wurden im Schweißzustand belassen und dann mit einer Vorschädigung von 70 – 90 % der rechnerischen Ermüdungsfestigkeit beaufschlagt. Nach einer darauf folgenden UIT-Behandlung wurde der Ermüdungsversuch weitergeführt. Erste Versuchsergebnisse in Bild 11 zeigen, dass die Anwendung des UIT-Verfahrens auch zur Ertüchtigung bestehender Konstruktionen sehr vielversprechend ist. Durch die nachträgliche UIT-Behandlung lassen sich Restlebensdauern, die mindestens das 15-fache der Restlebensdauer ohne Nachbehandlung betragen, erzielen.

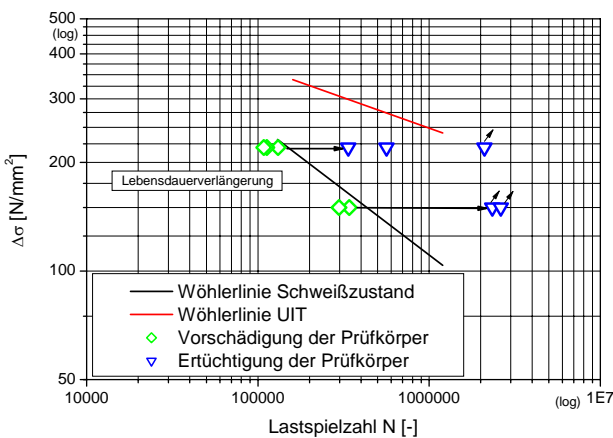


Bild 11. Lebensdauererlängerung durch nachträgliche Ertüchtigung mit UIT (Großprüfkörper, Quersteife, S460, $R=0,1$)

6 Ergebnisse von Schwingfestigkeitsuntersuchungen am Werkstoff S1100QL

Bei den Mobilkränen, Tragarmen von Betonpumpen, LKW-Ladekranen, usw. wird aus Gewichtsgründen immer mehr der Werkstoff S1100QL eingesetzt [9]. Da auch hier die Bauteile dynamisch beansprucht werden, hat die Firma ThyssenKrupp Stahl in Zusammenarbeit mit ESAB B.V. in Holland und Applied Ultrasonics Schwingversuche mit und ohne UIT-Behandlung durchgeführt.

Die Überprüfung der Schwingfestigkeit wurde an Flachzugproben mit einer Probenbreite im Schweißnahtbereich von 30 mm durchgeführt. Die Untersuchungen wurden auf einem 600-kN-Horizontal-Resonanzpulsler als Zug-Schwellversuche mit einem Spannungsverhältnis von $R = 0$ durchgeführt. Die Lastspielfrequenz betrug etwa 2000 min^{-1} . Wegen der bei Schwingversuchen üblichen Streuung wurden je Versuchsdurchgang 30 Proben eingesetzt. Zum Vergleich dienten ungeschweißte XABO 1100 Proben mit Walzhautoberfläche. Bild 12 gibt Auskunft über das Schwingverhalten der mit Fülldraht geschweißten Verbindung. Hieraus ist ersichtlich, dass ähnliche Festigkeitssteigerungen wie bei den Stählen S355 und S460 nämlich ca. 110% sowie eine Lebensdauererlängerung um das ca. 10-fache und mehr möglich sind. Außerdem erreichen die Werte fast die des unbeeinflussten Grundwerkstoffs.

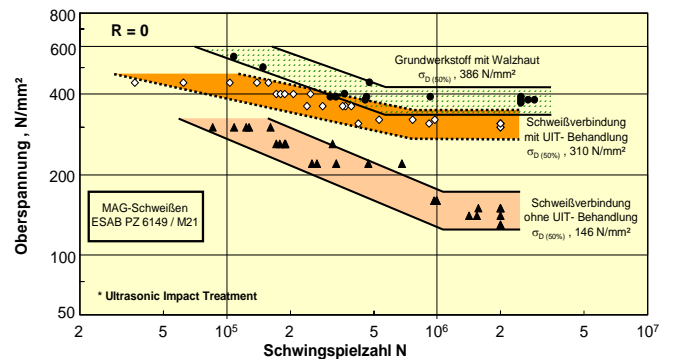


Bild 12. Stumpfstoß XABO 1100 UIT-behandelt

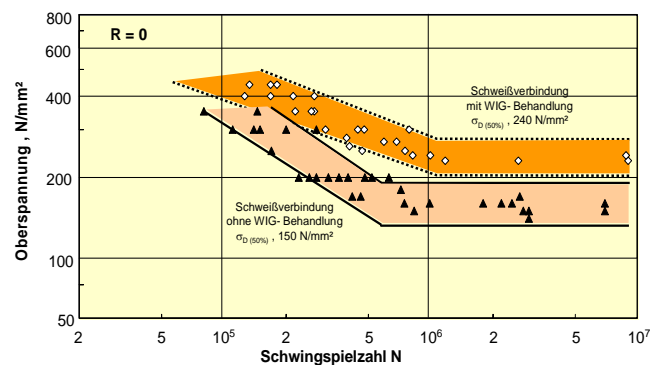


Bild 13. Stumpfstoß XABO 1100 WIG-behandelt

Als Vergleich zeigt die Abbildung 13 die erreichten Werte durch die Behandlung nach dem WIG-Aufschmelzverfahren, die jedoch nur eine Verbesserung der Schwingfestigkeit um ca. 60% brachte.

7 Weitere Anwendungsgebiete

Durch die plastische Verformung der Oberfläche und somit Einbringung von Druckeigenstressungen werden die Zugeigenstressungen im Bauteil praktisch eliminiert. So laufen zurzeit Versuche durch die UIT-Behandlung auf eine Spannungsarmglühung verzichten zu können. Dies wurde bereits mit Erfolg an bestimmten Bauteilen und Werkstoffen auch durch Abnahmegesellschaften akzeptiert. Ein weiteres Betätigungsfeld ist die Dimensionierung von Windkraftanlagen. Auch hier laufen Projekte mit den Herstellern, Abnahmegesellschaften und Universitäten.

Durch den problemlosen Einsatz auf Baustellen eignet sich das UIT-Verfahren auch bei Reparaturen, zum Beispiel Bronzpropeller, Weichen und Kreuzungstücke an Eisenbahnschienen, da in diesem Fall auch auf eine Spannungsarmglühung verzichtet werden kann.

8 Zusammenfassung

Höherfeste Feinkornbaustähle spielen im klassischen Stahlbau eine immer größere Rolle. In dynamisch belasteten Konstruktionen wird der Einsatz solcher Stähle aber durch die Ermüdungsfestigkeit eingeschränkt. Im vorliegenden Beitrag wurde vorgestellt, dass sich durch die Anwendung von Schweißnahtnachbehandlungsmethoden durchaus ein Potenzial zur Verbesserung der Ermüdungsfestigkeit von Schweißdetails aus hochfesten Stählen ergeben kann.

Wie die Ausführungen zeigen, ist mit der „Ultrasonic Impact Technology“ ein neues Verfahren entwickelt worden, das weltweit patentiert wurde. Die Einführung im Nord- und Südamerikanischen Raum ist bereits weiter fortgeschritten. Zurzeit laufen viele Projekte an verschiedenen Universitäten und Firmen speziell auch in Deutschland, die erreichten Ergebnisse, nicht nur auf dem Gebiet der Verbesserung der Schwingfestigkeit, übertreffen alle Erwartungen. Verglichen mit anderen Nachbehandlungsverfahren ist UIT wesentlich besser bei deutlich geringerem gerätetechnischer Aufwand und einfacher Handhabung. Das Verfahren lässt sich sehr gut in den Produktionsprozess integrieren und bei entsprechenden Stückzahlen auch mit dem Roboter durchführen. Hervorragende Ergebnisse wurden auch an Aluminiumlegierungen und –schweißverbindungen erzielt. Im Prinzip ist das Verfahren für alle metallischen Werkstoffe geeignet.

9 Schrifttum

- [1] prEN 1993-1-9: Eurocode 3, Teil 1-9: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten, Ermüdung, Entwurf Status 49 (2004).
- [2] Deutscher Ausschuss für Stahlbau: DASt-Richtlinie 011, Hochfeste schweißgeeignete Feinkornbaustähle mit Mindeststreckgrenzenwerten von 460 und 690 N/mm², Anwendung für Stahlbauten, (1988).
- [3] Änderung und Ergänzung der Anpassungsrichtlinie Stahlbau - Ausgabe Dezember 2001, DIBt-Mitteilungen 33 (2002) Nr. 1.
- [4] Deutsches Institut für Bautechnik: Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Z-30.1-1 (1999).
- [5] Statnikov, E.; Muktepavel, V.O.; Kuzmenko, A.Z.; Blomquist, A.; Comparison of Ultrasonic impact treatment (UIT) and other fatigue life improvement methods, IIW Document XIII 1817-00
- [6] Statnikov, E. et al.: Ultrasonic tool for ultrasonic strengthening and relaxation treatment. Patent of the RF No. 472782 (1975).
- [7] Haagensen, P.; Maddox, S.: Post weld improvement for steel and aluminium structures. IIW Doc. XIII-1815-00 (2004).
- [8] Kuhlmann, U.; Bergmann, J.; Dürr, A.; Thumser, R.; Günther, H.-P.; Gerth, U.: Erhöhung der Ermüdungsfestigkeit von geschweißten höherfesten Baustählen durch Anwendung von Nachbehandlungsverfahren. Stahlbau (zur Veröffentlichung).
- [9] Hamme, U.; Hauser, J.; Kern, A.; Schriever, U.: Einsatz hochfester Baustähle im Mobilkranbau; Stahlbau 69 (2000) 4, 295-305
- [10] Wegman, H.; ThyssenKrupp Stahl Bericht A vwe 279/PCG-TM-03/04 vom 06.01.2004